

地球環境変動予測に向けた北極域の変動とその全球的影響の解明

課題責任者

小室 芳樹 海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター

著者

小野 純*¹, 中村 哲*², 西井 和晃*³, 大石 龍太*⁴*¹ 海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター, *² 北海道大学 大学院地球環境科学研究科, *³ 三重大学 大学院生物資源学研究所, *⁴ 東京大学 大気海洋研究所

近年急激な変化が生じている北極域の変動メカニズムや、北極変動が全球気候へ与える影響を明らかにするために、気候モデルを用いた各種実験や変動の要因となる物理過程の検討を行った。将来気候下における北極温暖化増幅の排出シナリオ依存性について、気候モデルによる大規模アンサンブルのデータを解析した。その結果、氷-アルベドフィードバックが主要因となって、高位より低位の排出シナリオで北極温暖化増幅が強化されることが分かった。2020年の夏季に生じたユーラシア大陸での熱波と東アジアの豪雨の連関について調査した。北極温暖化を模した気候モデル実験の結果から、北極温暖化が熱波と豪雨をもたらしうることがわかった。また、熱波の要因となる大気場が強く現れるメンバーほど、東アジアの降水が強くなる傾向にあることが分かった。2021-2022年冬季に観測された大気循環偏差に対する海面水温偏差と海水偏差の寄与を大気大循環モデルAFESの実験に基づき評価した。また、モデル水平解像度への大気応答の依存性についても検討を行った。

キーワード：北極温暖化増幅, 異常気象, 北極海海水, 海面水温偏差, 大気海洋結合モデル

1. はじめに

北極域では近年急激な環境変化が生じ、その変化は極域のみならず熱帯や中緯度帯へと影響を及ぼすことが明らかになりつつある。本課題では、大気・海洋・氷床などの各プロセスの調査や気候モデルを用いた実験を通じて北極域の環境変動過程の理解を深め、北極域と全球の双方における気候変動のメカニズム解明や予測精度の改善を目的とした研究を行った。それぞれの研究で得られた成果を以降の節で報告する。

2. 将来気候予測における北極温暖化増幅

北極温暖化増幅は、元来、気候モデルによる将来予測結果に表れた特徴であったが、近年では過去数十年間の観測データでも確認されるようになってきた。これまでに北極温暖化増幅に寄与する様々なプロセスが提案されているが、排出シナリオに依存して将来の北極温暖化増幅がどのように変化するかについては、十分に検討されていなかった。本研究[1]では、北極温暖化増幅の排出シナリオ間の違いを調べるために、気候モデルMIROC6による過去気候再現および将来気候予測の50アンサンブルシミュレーションに加えて、観測およびCMIP6気候モデル(28モデル、各1メンバー)のデータを解析した。北極温暖化増幅や関連する物理量を異なるシナリオ間で比較するために、全球平均に対する北極平均の地表気温変化を北極温暖化増幅インデックス(AAI)と定義し、各物理量の変化を全球平均の地表気温変化量で規格化した。

過去気候再現シミュレーションの結果は、1990-2014年に観測された全球平均と北極平均の地表気温変化の関係

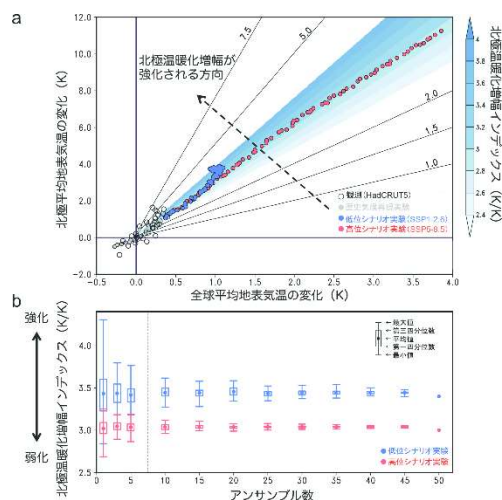


図1 (a) 1990年から2100年までの全球平均地表気温の変化と北極平均地表気温の変化の関係。(b) 2015年から2100年までの86年間で平均した北極温暖化増幅インデックスのアンサンブル数依存性。破線はシナリオ間の差が統計的に有意に現れるアンサンブル数を示す。

をよく再現しており、この期間で平均したモデルによるAAI ($3.3 \pm 0.8 \text{ K K}^{-1}$) は観測値 (3.9 K K^{-1}) を捉えている。将来気候予測シミュレーションの結果は、低排出シナリオで $3.4 \pm 0.2 \text{ K K}^{-1}$ 、高排出シナリオで $3.0 \pm 0.1 \text{ K K}^{-1}$ と、AAIは低排出シナリオで大きいことがわかった(図1a)。このようなAAIのシナリオ間の差は、アンサンブル数が10より大きいと統計的に有意に現れることもわかった(図1b)。さらに、AAIのシナリオ間の差は2040年代頃か

ら有意に現れ、それ以降の北極温暖化増幅は低排出シナリオで強化される。そして、これとほぼ同様のタイミングで海氷面積の変化にもシナリオ間の差が現れていることから、AAI と海氷面積の変化は連動していることが示唆された。

低排出シナリオで将来の北極域の温暖化が維持されるメカニズムを調べるために、将来気候（2080-2099年）における北極域で平均した地表面でのエネルギー収支変化をシナリオ間で比較した。低排出シナリオでは、将来気候においても晩夏の海氷が残っているため、氷-アルベドフィードバックを介して海洋表層に吸収された日射による過剰な熱が、晩秋に潜熱・顕熱フラックスによって大気へ放出されることにより北極域の温暖化が維持されていることがわかった。

最後に CMIP6 によるシミュレーションデータを用いて検証した結果、低排出シナリオでは、過去・近未来・将来の気候のいずれにおいても AAI と海氷面積変化の間に有意な負の相関関係が見られるのに対し、高排出シナリオでは、将来予測でその関係性が弱まるなど、大規模アンサンブルの結果を裏付ける結果が得られた。

3. 北極温暖化に伴う熱波と豪雨の連関

2020年夏、ユーラシア大陸の各地で記録的な天候が連続して起こった。一つはシベリアの熱波で、極東のベルホヤンスクで 38°C の高温を記録した。もう一つは東アジアの豪雨で、中国の長江流域および日本では九州を中心に全国的に強い降水が観測され、大きな被害があった。

近年の熱波の増大や強い降水イベントの増加の背景には、地球温暖化や長周期の大気海洋変動の影響など様々な要因が考えられるが、両者に直接の関係があるかどうかはこれまで議論されてこなかった。本研究では特に2020年夏の熱波と豪雨イベントに着目し、気象庁のグローバルアンサンブル予報モデルのデータから両者の関係を調査した。また、極端な北極温暖化が進行した状態を模した大気大循環モデル実験により、北極温暖化が両者の関係に与える影響を評価した[2]。

2020年6月下旬には極東シベリア上空のブロッキング高気圧が発生し、記録的な熱波の原因となった(図2a, b)。このブロッキングの発達はユーラシアを横断する波列状のパターン(EOF2)と、大陸全域の昇温傾向パターン(EOF4)の重ね合わせである(図2c, d)。気象庁のアンサンブル予報ではこのブロッキング高気圧の発達はよく再現されていた。アンサンブル予報の50メンバーを用いて構築した高度場と10日後の降水量の線型関係を利用し、観測されたブロッキング高気圧の強度で降水量予報を復元すると、東アジアの豪雨イベントの降水量が10-20%程度増加することがわかった。独立な検証として実施した北極温暖化実験では、6種類の境界条件に対するロバストな応答として極東を覆う高気圧偏差が現れた。これは観測の EOF4 パターンに対応する(図3a, d)。この EOF4 パターンの強度は、東アジアの降水量応答と明瞭な線形関係を示し(図

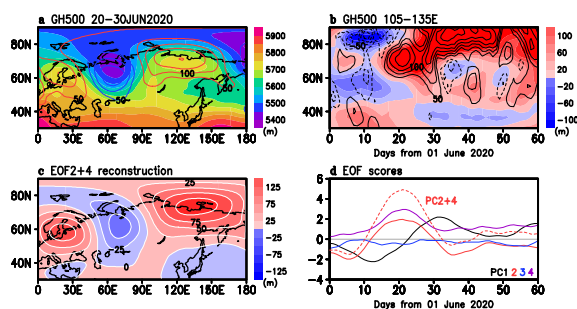


図2 JRA55 再解析データを使用した(a)2020年6月下旬の500hPa高度場とその年間偏差。(b)東経105-135°平均した高度場のホフメラ図。(c)500hPa高度場のEOF2および4による2020年6月下旬の場の復元。(d)EOFスコアの時系列。

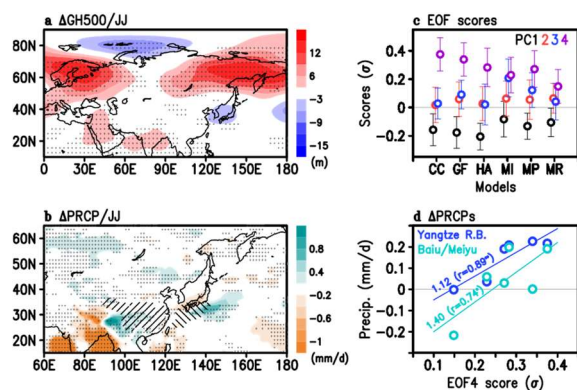


図3 AFES4.1を用いた北極温暖化実験における6、7月平均の(a)500hPa高度場と(b)降水量の応答。6種類の境界条件で応答信号が同符号の領域を点描で示す。(c)6種類の境界条件ごとの高度場偏差のEOFスコア。(d)境界条件ごとのEOFスコアに対する長江流域、梅雨領域の降水量応答。

3d, e)、2020年夏の状況とよく一致した。

アンサンブル予報、北極温暖化実験の解析結果はそれぞれ内部変動、外部強制による極東ブロッキング高気圧の発達に東アジアの豪雨イベントを強化することを示す。両者を結びつける力学的メカニズムの解明は今後の課題である。

4. 2021-22年冬季の海面水温偏差と海氷偏差への大気循環偏差の応答

2021-22年冬季(12月-2月)の平均気温は東日本と西日本で平均より低かった。この冬季について平均した対流圏循環偏差は日本の上空でわずかに負であり、これが寒冬の直接的な要因と考えられる(図4a)。その高緯度側には正偏差があり、これは北東太平洋の正偏差と繋がっている。一方、海面水温は東部熱帯太平洋において冷水偏差、海洋大陸付近で暖水偏差を示し、ラニーニャ現象の発生と整合的である(図4b)。北太平洋中緯度では顕著な暖水

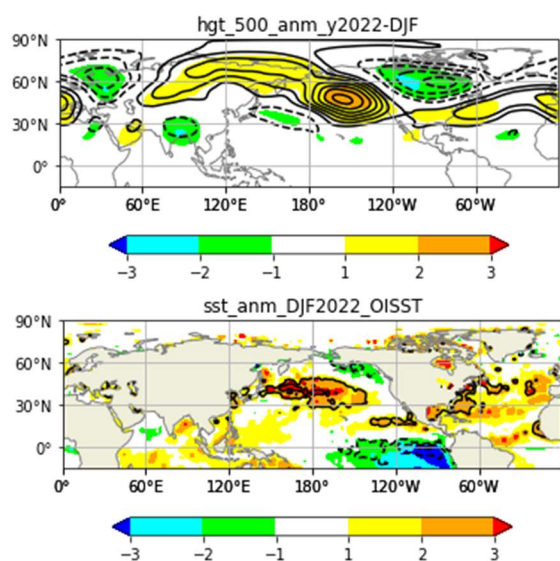


図4 2021-22年冬季(12月-2月)平均の(a)500hPa高度偏差(等値線、20m間隔)と(b)海面水温偏差(等値線、2K)。影は標準偏差。

偏差が存在している。さらに海氷密度はバレンツ海とオホーツク海上で例年より低かった(図略)。本研究ではこれら海面水温と海氷の偏差が、大気循環に及ぼす影響を調査した。調査は境界条件を変えた大気大循環モデルのタイムスライス実験に基づく。またこの影響のモデル解像度依存性についても調査した。

本研究では大気大循環モデル AFES を用いた。約 50km と約 100km の 2 種類の水平解像度の設定で実験した。海面水温と海氷密度データは日別の OISSTv2 を用いた。境界条件を変えながら以下の A から E の 5 種類の実験を行った(A: 観測された海面水温と海氷を与える実験、B: 海面水温は観測値を与え、海氷は気候値を与える実験、C: 熱帯の海面水温は観測値、中高緯度では気候値を与える実験、D: 熱帯の海面水温は気候値、中高緯度では観測値を与える実験、E: 海面水温と海氷ともに観測値を与える実験)。実験期間は 2021 年 9 月 1 日から 2022 年 2 月 28 日とし、各実験のアンサンブルメンバー数は 50 とした。温室効果気体の濃度は全ての実験において、現在気候の値で一定とした。気候平均場として 1991 年から 2020 年の平均を用いた。

水平解像度が約 100km の実験において、実験 A から実験 E のアンサンブル平均の差として評価した、全球の海面水温と海氷偏差に対する冬季平均 500hPa 高度場の応答は、北太平洋の中緯度で正の極大を示す(図 5a)。これは観測された正と負の高度場偏差のほぼ中央に位置するため、必ずしも観測の偏差を説明しない。中緯度の海面水温偏差に対する応答(実験 A と実験 C の差)においても北太平洋の中緯度で正の極大を示す(図 5c)。一方、熱帯の海面水温偏差への応答場(実験 C と実験 E の差; 図 5b)は高度場偏差の中心が南にずれている。さらに海氷偏差へ

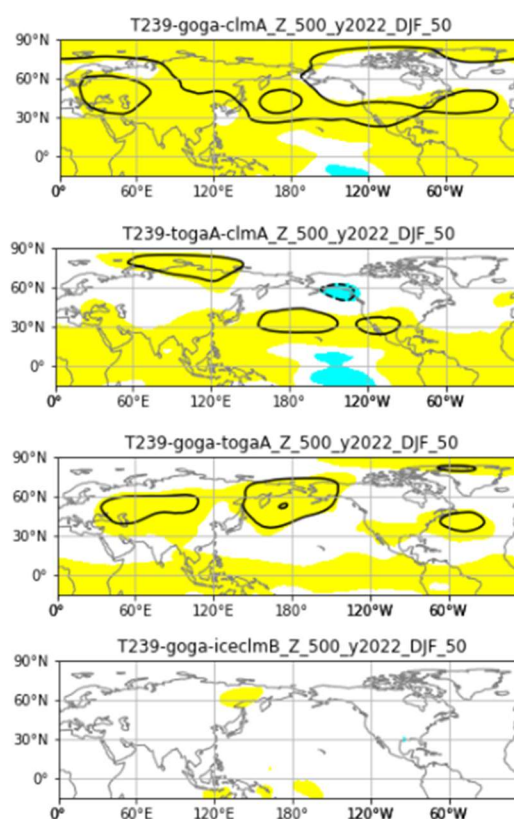


図5 2021-22年冬季平均の(a)海面水温および海氷偏差、(b)熱帯の水温偏差、(c)中高緯度の海面水温偏差および海氷偏差、(d)海氷偏差、に対する500hPa高度場応答(等値線、20m間隔)。影は5%有意な応答。

の応答場(実験 A と実験 B の差; 図 5d)では北太平洋上にほとんど応答が見られない。以上から図 5a で見られる北太平洋上の高気圧応答は中高緯度の海面水温偏差に対する応答である可能性が高い。以上の結果より、北太平洋の中高緯度で観測された高度場偏差は、海面水温偏差によって強制されたものでない可能性が高い。なお、図 5a と図 5c において、東ヨーロッパ上で高気圧応答が見られるため、この高気圧応答も中緯度の海面水温偏差が強制した可能性がある。ただし、これも観測には対応する偏差は確認できない。水平解像度を約 100km とした実験における冬季平均の大気循環応答は、水平解像度約 50km の実験とほぼ同じ結果を示した(図略)。しかし、個々の月の応答場は必ずしも一致しなかった。これらの高度場応答の形成要因とその解像度依存性については今後の課題である。

5. 地球システムモデルの改良

本課題では、大気海洋大循環モデル MIROC4m および大気海洋植生結合モデル MIROC4m-LPJ を ES で運用している[3-7]。先般の ES の仕様変更の前後でこれらのモデルの挙動が大幅に異なったため、ES ユーザーサポートの支援

のもと、研究グループで原因の調査と特定を行った。それらの調査結果を反映したコードの整備と修正を行って問題点を解決し、最終的に仕様変更前と同一の結果を得ることができるようになった。

本研究で新規に開発している氷床表面質量収支の推定方法に基づく結果と、リファレンスとして用いる領域気象モデルNHM-SMAPの結果を比較したところ、両者の表面質量収支は系統的に乖離していた。両者の差異の原因を特定するために、水収支を構成する項ごとに比較を行った結果、昇華の扱いの違いが表面質量収支に最も大きな影響を与えていることが明らかになった。氷床上の大気下層では、氷床の性質上、安定成層が強いため、鉛直方向の水輸送の定式化に注意が必要と考えられる。これらのモデルを気候モデルに結合する際の仕様を決定するため、公開されている最新のグリーンランド氷床の地形データを元に新たな境界条件を作成し、解像度に関する基本的な知見を得るために、グリーンランド氷床の感度を精査した。その結果、空間解像度4.5km程度までは十分に実用的であることが明らかになった。

謝辞

本研究は、文部科学省の「統合的気候モデル高度化研究プログラム (JPMXD0717935457)」、「北極域研究推進プロジェクト (ArCS) JPMXD1300000000」、「北極域研究加速プロジェクト (ArCS II) JPMXD1420318865」の支援を受けて実施された。

文献

- [1] Ono, J., Watanabe, M., Komuro, Y., Tatebe, H., and Abe, M., “Enhanced Arctic warming amplification revealed in a low-emission scenario”, *Communications Earth and Environment*, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00354-4> (2022).
- [2] Nakamura, T., and Sato, T., “A possible linkage of Eurasian heat wave and East Asian heavy rainfall in Relation to the Rapid Arctic warming”, *Environmental Research.*, 209, 112881, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112881> (2022).
- [3] Yamamoto, M., Clemens, S. C., Seki, O., Tsuchiya, Y., Huang, Y., O'ishi, R., and Abe-Ouchi, A., “Increased interglacial atmospheric CO₂ levels followed the mid-Pleistocene Transition”, *Nature Geoscience*, 15, 307–313. doi:10.1038/s41561-022-00918-1 (2022).
- [4] Edwards, T. L., Nowicki, S., Marzeion, B., Hock, R., Goelzer, H., Seroussi, H., Jourdain, N. C., Slater, D. A., Turner, F. E., Smith, C. J., McKenna, C. M., Simon, E., Abe-Ouchi, A., Gregory, J. M., Larour, E., Lipscomb, W. H., Payne, A. J., Shepherd, A., Agosta, C., Alexander, P., Albrecht, T., Anderson, B., Asay-Davis, X., Aschwanden, A., Barthel, A., Bliss, A., Calov, R., Chambers, C., Champollion, N., Choi, Y., Cullather, R., Cuzzzone, J., Dumas, C., Felikson, D., Fettweis, X., Fujita, K., Galton-Fenzi, B. K., Gladstone, R., Golledge, N. R., Greve, R., Hattermann, T., Hoffman, M. J., Humbert, A., Huss, M., Huybrechts, P., Immerzeel, W., Kleiner, T., Kraaijenbrink, P., Le Clec'h, S., Lee, V., Leguy, G. R., Little, C. M., Lowry, D. P., Malles, J., Martin, D. F., Maussion, F., Morlighem, M., O'Neill, J. F., Nias, I., Pattyn, F., Pelle, T., Price, S. F., Quiquet, A., Radic, V., Reese, R., Rounce, D. R., Ruckamp, M., Sakai, A., Shafer, C., Schlegel, N., Shannon, S., Smith, R. S., Straneo, F., Sun, S., Tarasov, L., Trusel, L. D., Van Breedam, J., van de Wal, R., van den Broeke, M., Winkelmann, R., Zekollari, H., Zhao, C., Zhang, T., and Zwinger, T., “Projected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise.” *Nature*, 593, 74–82. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03302-y> (2021).
- [5] Payne, A. J., Nowicki, S., Abe-Ouchi, A., Agosta, C., Alexander, P., Albrecht, T., Asay-Davis, X., Aschwanden, A., Barthel, A., Bracegirdle, T. J., Calov, R., Chambers, C., Choi, Y., Cullather, R., Cuzzzone, J., Dumas, C., Edwards, T. L., Felikson, D., Fettweis, X., Galton-Fenzi, B. K., Goelzer, H., Gladstone, R., Golledge, N. R., Gregory, J. M., Greve, R., Hattermann, T., Hoffman, M. J., Humbert, A., Huybrechts, P., Jourdain, N. C., Kleiner, T., Munneke, P. K., Larour, E., Le Clec'h, S., Lee, V., Leguy, G., Lipscomb, W. H., Little, C. M., Lowry, D. P., Morlighem, M., Nias, I., Pattyn, F., Pelle, T., Price, S. F., Quiquet, A., Reese, R., Rueckamp, M., Schlege, N., Seroussi, H., Shepherd, A., Simon, E., Slater, D., Smith, R. S., Straneo, F., Sun, S., Tarasov, L., Trusel, L. D., Van Breedam, J., van de Wal, R., van den Broeke, M., Winkelmann, R., Zhao, C., Zhang, T., and Zwinger, T., “Future Sea Level Change Under Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 and Phase 6 Scenarios From the Greenland and Antarctic Ice Sheets.” *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091741. doi:10.1029/2020GL091741 (2021).
- [6] Goelzer, H., Nowicki, S., Payne, A., Larour, E., Seroussi, H., Lipscomb, W. H., Gregory, J., Abe-Ouchi, A., Shepherd, A., Simon, E., Agosta, C., Alexander, P., Aschwanden, A., Barthel, A., Calov, R., Chambers, C., Choi, Y., Cuzzzone, J., Dumas, C., Edwards, T., Felikson, D., Fettweis, X., Golledge, N. R., Greve, R., Humbert, A., Huybrechts, P., Le clec'h, S., Lee, V., Leguy, G., Little, C., Lowry, D. P., Morlighem, M., Nias, I., Quiquet, A., Rückamp, M., Schlegel, N.-J., Slater, D. A., Smith, R. S., Straneo, F., Tarasov, L., van de Wal, R., and van den Broeke, M., “The future sea-level contribution of the Greenland ice sheet: a multi-model ensemble study of ISMIP6”, *The Cryosphere*, 14, 3071–3096, <https://doi.org/10.5194/tc-14-3071-2020> (2020).
- [7] Nowicki, S., Goelzer, H., Seroussi, H., Payne, A. J., Lipscomb, W. H., Abe-Ouchi, A., Agosta, C., Alexander, P., Asay-Davis, X. S., Barthel, A., Bracegirdle, T. J., Cullather, R., Felikson, D., Fettweis, X., Gregory, J. M., Hattermann, T., Jourdain, N. C., Kuipers Munneke, P., Larour, E., Little, C. M., Morlighem, M., Nias, I., Shepherd, A., Simon, E., Slater, D., Smith, R. S., Straneo, F., Trusel, L. D., van den Broeke, M. R., and van de Wal, R. “Experimental protocol for sea level projections from ISMIP6 stand-alone ice sheet models”, *The Cryosphere*, 14, 2331–2368, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2331-2020> (2020).

Understanding the Arctic Climate Change and Its Global Impact for Climate Change Projection

Yoshiki Komuro Institute for Arctic Climate and Environmental Research, Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Jun Ono ^{*1}, Tetsu Nakamura ^{*2}, Kazuaki Nishii ^{*3}, Ryouta O'ishi ^{*4}

^{*1}Institute for Arctic Climate and Environmental Research, Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*2}Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, ^{*3}Graduate School of Bioresources, Mie University, ^{*4}Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo,

This project aimed to enhance understanding in the climate variability and its mechanisms in the Arctic region where warming has been remarkable in recent years. Numerical experiments using global climate models and data analysis have been conducted for this purpose. Using 50-member historical and scenario simulations by a single climate model, we revealed that the Arctic warming amplification is enhanced in a low-emission scenario, mainly via ice-albedo feedback, after the mid-2040s. The studies have further extended to examine the impact of Arctic change to midlatitude regions. Climate model simulation replicating a warmed Arctic condition showed tendencies of Eurasian heat wave and East Asian heavy rainfall, indicating their physical linkage. Another study using an atmospheric circulation model, AFES, for winter 2021-2022 revealed each contribution of anomalous sea surface temperature and sea ice. The influence of the horizontal resolution of the model was also discussed.

Keywords : Arctic warming amplification, Abnormal weather, Arctic Sea ice, sea surface temperature, coupled model

1. Introduction

Arctic region has experienced rapid change in natural environment. Past studies have suggested that the Arctic change can exert impacts over lower latitude regions. This project attempted to understand the climate variability and its mechanisms in the Arctic region. This project conducted numerical experiments using global climate models to deepen our understanding in the process behind the Arctic change and its impact across the globe. The results obtained from these experiments are reported in the following sections.

2. Arctic warming amplification in future climate

Arctic warming amplification (AA) is a widely recognized phenomenon, representing that surface temperature over the Arctic region increases faster than in other latitudes. Various processes have been proposed to explain AA. Studies have shown that ice-albedo feedback is a significant contributor to AA although relative contributions are still under debate. Given that projected sea ice area (SIA) in September will robustly decrease regardless of the emission scenarios, the difference in future AA is likely to emerge depending on the SIA change in the scenarios through the ice-albedo feedback. To verify this hypothesis, we analyzed 50-ensemble members of historical and two SSP (Shared Socioeconomic Pathways) simulations by a single climate model, MIROC6, along with observational data [1]. We also used 28 climate model simulations from CMIP6, to confirm

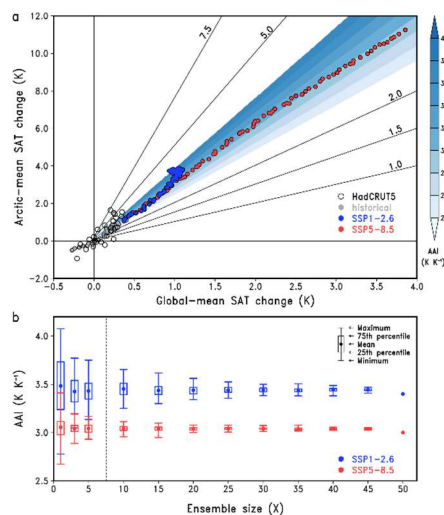


Fig. 1 (a) Scatter plots of the Arctic-mean (northward of 65°N) SAT change (K) against the global-mean SAT change (K) from observation (HadCRUT5; black) and the MIROC6 large-ensemble (historical; grey, SSP1-2.6; blue, SSP5-8.5; red, each plot indicates the 50-member ensemble mean). Background shading and lines represent AAI ($K K^{-1}$). (b) Box-and-whisker plots of AAI averaged over 2015–2100 in SSP1-2.6 (blue) and SSP5-8.5 (red) as a function of ensemble size. The vertical dashed line indicates a threshold beyond which the two ensembles are statistically separated.

the robustness of our results. In this study, the Arctic amplification index is defined as the ratio of the Arctic-mean to the global-mean surface air temperature (SAT) changes. The historical simulation reproduces the observed SAT change since 1980 averaged over the globe and the Arctic. In future projections, both temperature changes are larger in the high-emission scenario than in the low-emission scenario. However, scatter plots show that AAI is larger in the low-emission scenario than in the high-emission scenario (Fig. 1a). This is detectable due to the large ensemble size, which can be separated by ten or more members in MIROC6 (Fig. 1b). The AAI difference between the two scenarios becomes statistically significant after the mid-2040s, similar to that of sea-ice change. To clarify the mechanism, we further investigated the Arctic surface energy budgets. In the low-emission scenario, sea ice continues to exist by the end of this century and the ice-albedo feedback maintains Arctic warming, unlike other latitudes. The CMIP6 multi-model analyses also support our results, implying that global warming mitigation may have a side effect because the enhanced AA potentially increases mid-latitude extreme weather by weakening the polar vortex.

3. Eurasian heat wave and East Asian heavy rainfall

In June–July 2020 two remarkable weather events occurred in northern Eurasia. One is a severe heat wave that produced a record-breaking temperature of 38 °C at Verkhoyansk, eastern Siberia on 20 June. The other one is heavy rainfall observed in East Asia (southern China and southwestern Japan) in early July, causing severe floods that brought about considerable damage to infrastructure and the economy, as well as the loss of human lives. Despite the accumulated evidence of stronger and more extreme heat waves and heavy rainfall as a result of global warming, little is known about the linkage between these phenomena. Given that the Arctic is warming twice as fast as the global mean, Arctic warming might be enhancing the increase of heavy rainfall events in East Asia.

Here, we investigated the relationship between the Siberian heat wave and the East Asian heavy rainfall that occurred summer in 2020 [2]. An empirical orthogonal function (EOF) analysis applied to atmospheric reanalysis data of 1958–2020 period captures dominant summer circulation patterns reflecting atmospheric internal variability and externally forced anomalies. On the basis of these EOF patterns, operational forecasts of summer 2020 using the global model from the Japan Meteorological Agency (JMA) and a global climate model experiment based on 2-K warming future projection are utilized to examine roles of the internal variability and external forcing, respectively. Consistent results between them reveal that development of the blocking high over eastern Siberia has certain impacts on rainfall anomalies over East Asia. By a statistical technique applied to the ensemble forecast data, prediction of the East Asian precipitation is improved by 10–20% of its amplitude.

Our research demonstrates possibility that East Asian rainfall is being enhanced by high-latitude atmospheric circulations due to the Arctic warming even in the current climate in which the tropical warming is not yet severe. Suggestions are given that continued Arctic warming and a future increase of tropical warming will lead to increases of the frequency and severity of heavy rainfall events in East Asia.

4. Atmospheric circulation anomalies in the 2021-2022 winter

Mean surface temperature in most areas of Japan was lower than climatology in the 2021-2022 winter, which accompanied a negative height anomaly just over Japan. This negative anomaly accompanied a positive height anomaly to its north that connects with another positive anomaly located over the eastern North Pacific. The aim of this study is to investigate if those circulation anomalies were forced by anomalous boundary conditions of sea ice and sea surface temperatures (SSTs) in that winter. In particular, the tropical SST was characterized by La Nina, while the extratropical North Pacific showed a warm anomaly. The sea ice concentration in the Barents Sea was less than the climatology. We conducted a set of ensemble experiments with an atmospheric general circulation model, called AFES, prescribed with various boundary conditions. The horizontal resolution is set to about 50 km. The number of ensemble members in each experiment is 50. The warm SST anomaly in the midlatitude North Pacific might force a positive height anomaly over there. Its location is, however, different from the observed anomaly, and the observed cooling in Japan is not explained by the response to the SST. Another positive height response is formed as atmospheric response to the observed tropical SST anomalies, but the location is, again different from the observed anomaly. These results suggest that observed circulation anomaly over the North Pacific might not be forced by SST anomalies. The observed sea ice anomalies are also found not to explain the circulation anomaly.

We also conduct another set of AFES experiments with 100-km horizontal resolution. The winter-mean responses in the 100-km AFES are similar to these in 50-km AFES. Meanwhile, we recognized some differences in the atmospheric responses if it is investigated in monthly basis. The reasons are hoped to be solved in our future works.

Acknowledgement

The present study was supported in part by the Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU) Grant Number JPMXD0717935457 from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan, and by the Arctic Challenge for Sustainability II (ArCS II) Project (Program Grant Number JPMXD1420318865).

References

[1] Ono, J., Watanabe, M., Komuro, Y., Tatebe, H., and Abe, M., “Enhanced Arctic warming amplification revealed in a low-emission scenario”, *Communications Earth and Environment*, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00354-4> (2022).

[2] Nakamura, T., and Sato, T., “A possible linkage of Eurasian heat wave and East Asian heavy rainfall in Relation to the Rapid Arctic warming”, *Environmental Research.*, 209, 112881, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112881> (2022).